

# 포졸란 재료와 순환골재를 사용한 콘크리트의 화학약품 저항성

## Chemical Resistance of Recycled Aggregate Concrete Using Pozzolanic Materials

(2010년 8월 20일 원고접수, 2010년 9월 17일 심사완료/ Received August 20, Accepted September 17, 2010)

문 대 중<sup>1)</sup> 최 재 진<sup>2)\*</sup> 김 완 중<sup>3)</sup> 김 학 수<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(주)이제이텍 기술연구소 <sup>2)</sup>공주대학교 건설환경공학부 <sup>3)</sup>호남대학교 토목환경공학과

Dae-Joong Moon<sup>1)</sup> Jae-Jin Choi<sup>2)\*</sup> Wan-Jong Kim<sup>3)</sup> Hak-Soo Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>EJtech Co., Ltd., Seongnam, 463-800, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, 330-717, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Honam University, Gwangju, 506-090, Korea

### Abstract

This study investigates the chemical resistance of the recycled aggregate concrete containing calcined ground slag, fly ash, and diatom powder. The recycled aggregate which had the density of 2.48 g/cm<sup>3</sup>, the absorption of 4.25%, and standard gradation was used and the concrete specimens were submerged in solutions of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and CaCl<sub>2</sub> at 10% concentration for 6 months. As the submersion result, pore volume of over 0.02μm diameter was formed less in the concrete specimens containing calcined ground slag, fly ash, and diatom powder than in the concrete without the pozzolanic materials and the result shows the effectiveness of the pozzolanic materials for the increase of chemical resistance of the recycled aggregate concrete.

**키워드 :** 순환골재, 순환골재 콘크리트, 포졸란 재료, 내화학약품성

**Keywords :** Recycled Aggregate; Recycled Aggregate Concrete; Pozzolan Material; Chemical Resistance

## 1. 서 론

최근 생활수준이 크게 향상됨으로써 발생하는 각종 폐기물이 크게 증가하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 산업 폐기물 중 건설폐기물은 콘크리트 구조물의 노후화, 성능저하 및 용도의 변경 등으로 점차 증가되고 있으며, 환경부 통계에 따르면 2008년도 건설폐기물의 발생량은 연간 6,440만톤이 발생되었고, 폐콘크리트량은 연간 3,230만톤 정도가 발생되었다.<sup>1)</sup>

이러한 폐콘크리트 등은 재자원화가 가능한 것으로 2003년 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률의 제정, 2005년 순환골재 품질기준<sup>2)</sup>의 제정이 이루어졌고 또한 콘크리트용 골재로 활용하기 위하여 2006년 KS F 2573(콘크리트용 순환골재)의 제정과 KS F 4009 (레디믹스트 콘크리트)에서 순환골재의 사용이 가능하도록 규격이 개정됨에 따라 순환골재의 사용에 대한 법적 근거가 확보되었다.

그러나 건설폐기물 중 약 65%를 차지하고 있는 폐콘크리트를 적정처리한 후 생산된 순환골재는 많은 양이 성복토용 등 저부가가치용으로 활용되고 있는 상황이다. 그 이유는 순환골재의 경우 모르타르의 부착상태와 그 양에 따라 물성이 변화하기 때문이다. 또한, 순환골재를 사용한 콘크리트는 강도 및 동결융해에 대한 내구성이 보통콘크리트보다 저하하는 경향이 있어서 이를 해결하기 위하여 폐콘크리트의 파쇄방법을 변화시켜 고품질의 순환골재를 제조하는 방법과 저품질 순환골재와 포졸란 재료를 동시에 사용하여 신모르타르의 품질을 향상시키는 방법 등에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.<sup>3-8)</sup>

본 연구에서는 플라이애쉬, 슬래그 미분말 및 규조분말의 포졸란 재료를 사용한 순환골재 콘크리트의 화학약품

\* Corresponding author

E-mail : jjchoi@kongju.ac.kr

저항성을 평가하기 위하여 포졸란 재료를 사용한 순환골재 콘크리트를 제조한 다음 10% CaCl<sub>2</sub> 용액 및 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액의 화학약품에 대한 저항성을 검토하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 포졸란 재료

Table 1은 시멘트 및 포졸란 재료의 화학성분을 나타낸 것으로 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)와 초조강포틀랜드시멘트(이하 ERC)를 사용하였으며, 포졸란 재료로는 플라이애쉬(이하 FA), 600℃로 하소한 슬래그 미분말(이하 SP) 및 규조분말(이하 DT)을 사용하였다.

#### 2.1.2 골재

Table 2는 골재의 물리적 성질을 나타낸 것으로 잔골재는 밀도 2.63g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 1.59%인 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재는 일반 부순골재(이하 CA)와 순환골재(이하 RA)를 사용하였다.

### 2.1.3 화학혼화제

화학혼화제는 공기연행제(이하 AE)와 밀도 1.19~1.23g/cm<sup>3</sup>, pH 8.0~10.0의 고성능감수제(이하 HRWR)를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 순환골재 콘크리트의 화학약품 저항성을 평가하기 위해  $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작한 다음 재령 28일까지 23±2℃의 조건으로 수중양생한 후 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 10% CaCl<sub>2</sub>의 화학약품에 침지하여 1개월 간격으로 강도변화 및 질량변화를 측정하였다. 또한 콘크리트 내부의 기공율과 기공크기를 측정하기 위하여 미국 Micromeritics사의 Autopore II 9200을 사용하였다. 시료의 화학조성은 EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) 분석장치를 이용하여 시험하였다.

### 2.3 배합

Table 3은 콘크리트의 배합을 나타낸 것으로 물-결합재비 52%, 슬럼프 110±10mm, 공기량 4.0±0.5%를 목표로

Table 1. Chemical compositions of cement and pozzolanic materials

Sample	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	L.O.I
OPC	61.4	20.5	6.4	3.0	2.9	2.1	1.2	0.8
ERC	60.9	20.6	6.1	2.7	2.9	4.7	-	0.7
SP	33.5	44.2	14.0	4.9	0.8	1.4	0.9	0.1
FA	4.22	55.0	21.1	1.2	10.9	0.06	1.0	5.0
DT	0.70	84.58	5.31	0.32	2.27	0.27	4.84	1.20

Table 2. Physical properties of crushed aggregate and recycled aggregate

Aggregate	Gmax(mm)	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Absorption(%)	F.M.	Unit mass(kg/m <sup>3</sup> )
CA	25	2.63	0.73	6.95	1,502
RA	25	2.48	4.25	6.65	1,483

Table 3. Concrete mix proportions

Type	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )								Chemical admixture(C×%)		Slump (mm)	Air (%)
	OPC	ERC	W	S	G	SP	FA	DT	AE	HRWR		
RAC0	334	-	174	836	933	-	-	-	0.15	0.6	100	4.0
RAC2	225	8.35	174	820	869	16.7	83.5	-	0.50	0.5	115	4.3
RAC3	225	8.35	174	817	867	-	83.5	16.7	0.60	0.5	115	4.3
RAC4	259	8.35	174	825	860	16.7	50.1	-	0.35	0.5	110	3.8
RAC5	259	8.35	174	823	860	-	50.1	16.7	0.40	0.5	110	3.8

Table 4. Compressive strength of the concrete in 10 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (MPa)

Type	Immersed age (Months)						
	0	1	2	3	4	5	6
RAC0	23.9	29.0	29.4	30.2	30.9	30.3	29.7
RAC2	31.1	34.3	38.1	38.2	37.4	37.3	36.3
RAC3	31.4	37.6	39.3	39.5	41.6	40.6	39.9
RAC4	31.7	38.3	42.3	41.3	40.2	39.6	39.1
RAC5	32.7	35.2	37.1	38.1	38.7	38.0	37.4

Table 5. Compressive strength of the concrete in 10 % CaCl<sub>2</sub> (MPa)

Type	Immersed age (Months)						
	0	1	2	3	4	5	6
RAC0	23.9	29.0	29.4	30.2	30.9	30.3	29.7
RAC2	31.1	32.2	38.5	38.8	35.3	34.4	33.5
RAC3	31.4	34.3	37.7	40.2	37.6	36.7	36.1
RAC4	31.7	37.2	41.2	42.3	43.1	41.3	39.9
RAC5	32.7	34.1	39.9	39.7	36.8	35.6	34.5

정하였다. 이 표에서 RAC0은 기준콘크리트 배합으로서 부순골재를 사용하였으며, 나머지 배합에서는 순환골재를 사용하였다. 포졸란 재료를 사용한 배합에서는 초기강도를 촉진시키기 위하여 초조강 포틀랜드시멘트를 기준콘크리트 배합에서의 보통포틀랜드시멘트 질량의 2.5% 만큼 사용하였으며, 또한 기준콘크리트 배합에서의 보통포틀랜드시멘트 질량에 대하여 슬래그 미분말 또는 규조분말을 5%, 플라이애쉬를 15% 및 25% 혼합 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압축강도에 미치는 영향

Table 4와 Table 5는 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 10% CaCl<sub>2</sub> 용액의 두 가지 화학약품에 재령 28일의 원주형 공시체를 침지한 후 시간 경과에 따른 강도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 화학약품에 6개월 동안 침지한 콘크리트의 압축강도 변화를 나타낸 것이다.

이 그림에서 보통포틀랜드시멘트와 부순돌을 사용한 콘크리트의 압축강도는 침지기간 4개월까지 점진적으로 증가하였으나 침지기간 4개월 이후에는 강도가 감소하였다.

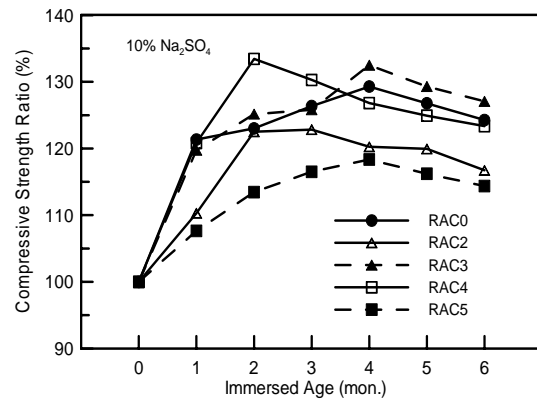


Fig. 1 Compressive strength ratio of the concrete immersed in 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

한편, 포졸란 재료를 사용하여 제조한 순환골재 콘크리트의 압축강도 변화율은 콘크리트의 배합에 따라 차이가 있었으며, RAC2 및 RAC4는 침지기간 2개월까지는 압축강도가 증가하였으나, 침지기간 2개월 이후에는 감소하였다. RAC3 및 RAC5는 RAC0과 비슷한 경향으로 침지기간 4개월까지는 강도증가율이 증가하였으나, 그 이후에는 감소하는 결과를 얻었다. 이와 같은 현상이 발생한 이유는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에 침지한 콘크리트 중에는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이온 및 시멘트 수화물과의 반응으로 인하여 식(1)~식(3)과 같이

ettringite, gypsum 및 thaumasite 등의 반응생성물이 생성되며,<sup>9)</sup> 이 때문에 콘크리트의 강도감소가 발생한 것으로 판단된다.

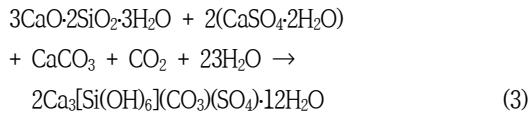
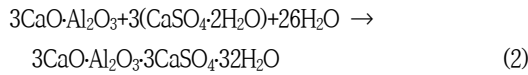
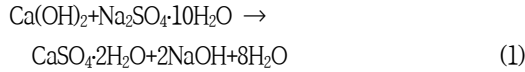


Fig. 2는 10% CaCl<sub>2</sub> 화학약품에 6개월 동안 침지한 콘크리트의 압축강도변화를 나타낸 그림이다. 부순돌을 사용한 기준콘크리트(RAC0)의 침지기간 2개월 압축강도는 침지 전 콘크리트의 압축강도에 비하여 약 20%의 강도증진이 있었으나, 그 이후의 침지기간에서는 강도가 감소하는 경향을 나타냈다. RAC2, RAC3 및 RAC5는 침지기간 3개월 이후 강도가 저하되는 경향이 있었으며, RAC4는 침지기간 4개월까지 강도증진이 나타났다.

콘크리트를 CaCl<sub>2</sub> 용액에 침지할 경우, 식(4)와 같이 칼슘 옥시클로라이드(calcium oxychloride)가 생성되며, 칼슘 옥시클로라이드는 콘크리트에 거의 무해한 반응생성물인 Friedel's salt와 달리 콘크리트의 강도저하 등의 성능저하를 일으킨다고 알려져 있다.<sup>10)</sup> 본 실험에서 CaCl<sub>2</sub> 용액에의 침지기간 2-4개월 이후 강도가 저하된 것도 상기 반응생성물에 의한 콘크리트 내부조직의 손상이 주원인이었음으로 추정된다.

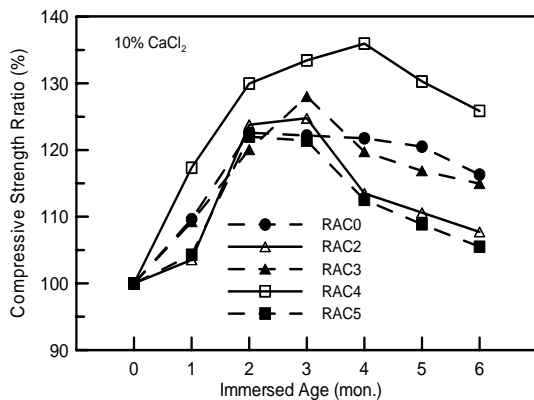
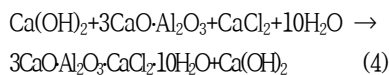


Fig. 2 Compressive strength ratio of the concrete immersed in 10% CaCl<sub>2</sub>

### 3.2 질량변화에 미치는 영향

Fig. 3과 Fig. 4는 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 10% CaCl<sub>2</sub> 용액의 화학약품에 침지한 순환골재 콘크리트의 침지기간에 따른 질량변화를 나타낸 것이다.

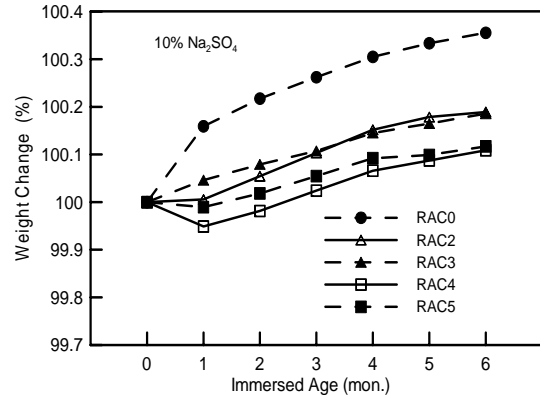


Fig. 3 Change in weight of the concrete immersed in 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

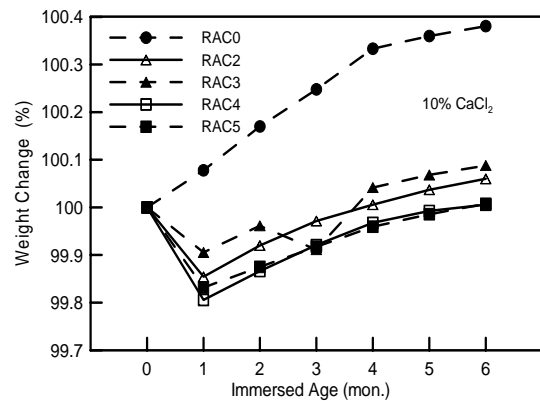


Fig. 4 Change in weight of the concrete immersed in 10% CaCl<sub>2</sub>

Fig. 3은 10% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에 침지한 콘크리트의 질량변화를 정리한 것으로 포졸란 재료를 혼합하지 않은 콘크리트의 질량은 침지기간이 증가함에 따라 증가하여 침지기간 6개월에서는 약 0.36% 증가하였으며, 콘크리트 내부 공극의 체적팽창이 원인으로 작용한 것으로 생각된다. RAC2 및 RAC3은 침지기간 1개월에서 약간 질량이 감소하였으나, 침지기간 2개월 이후부터는 침지기간이 따라 약간 증가하였다. RAC4 및 RAC5도 침지기간이 증가함에 약간씩 질량이 증가하여 침지기간 6개월에서 0.1%의 질량증가가 있었다. 결국 혼화재를 혼합함으로써 혼화재를 혼합하지

않은 콘크리트에 비하여 질량 변화율이 작게 되는 경향을 나타냈다.

Fig. 4는  $\text{CaCl}_2$  용액에 침지한 콘크리트의 질량변화를 정리한 것으로 10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액에 침지한 경우와 마찬가지로 혼화재를 혼합하지 않은 기준콘크리트(RAC0)의 질량은 침지기간이 증가함에 따라 증가하여 침지기간 6개월에서 약 0.4%로 크게 증가하였다. 한편, 혼화재를 혼합함으로써 침지기간 1개월에서 0.1%~0.2% 정도 질량이 감소하였으며, 그 이후 침지기간이 증가함에 따라 점차적으로 질량이 증가하여 침지기간 6개월에서 콘크리트의 질량은 침지전과 거의 같은 값을 나타내고 있다.

이와 같이 콘크리트의 질량변화는 화학약품에 의해 생성되는 시멘트 수화물이 콘크리트 내부공극을 채워줌에 따른 결과로 생각된다. 그러나, 혼화재를 혼합함으로써 콘크리트의 질량변화가 크게 발생하지 않는 이유는 시멘트 입자 사이를 밀실하게 채워주는 혼화재의 충전효과에 의하여 혼화재를 혼합하지 않은 콘크리트에 비하여 콘크리트의 내부공극에 수화물이 작게 침전되기 때문으로 생각된다.

### 3.3 공극분포 및 X-Ray 회절 분석

Fig. 5는 포졸란 재료를 혼합하지 않은 콘크리트의 6개월 동안의 화학약품 침지에 따른 수화물의 형성을 분석하기 위하여 X-Ray 회절분석 시험을 실시하여 비교한 것이다.

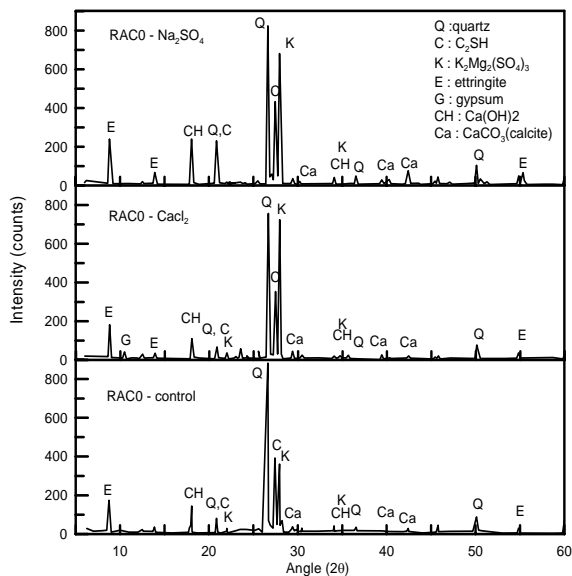


Fig. 5 X.R.D of the concrete(RAC0) immersed in a chemical solution

이 그림에서 화학약품에 침지한 경우 수화물로서 에트링가이트, 수산화칼슘과 장기재령에서 나타나는  $\text{C}_2\text{SH}$  및  $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ 에 용해되어 Na 및 Ca를 나타내는  $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ 가 보였다.

Fig. 6은 포졸란 재료로서 규조분말을 혼합한 순환골재 콘크리트의 6개월 동안의 화학약품 침지후의 X-Ray 회절 분석을 실시한 결과이다.

이 그림에서 화학약품에 침지하기 전의 시멘트 수화물로서  $\text{C}_2\text{SH}$ 의 피크가 가장 크게 나타났으며, 에트링가이트 및 수산화칼슘의 피크는 매우 작게 나타났다.

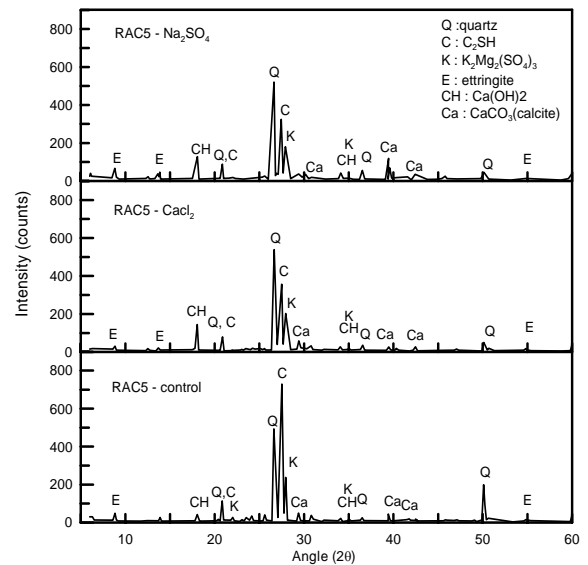


Fig. 6 X.R.D of the concrete mixed with pozzolanic material(RAC5), immersed in a chemical solution

반면에 화학약품에 침지하므로써  $\text{C}_2\text{SH}$ 의 피크가 감소하였으며, 에트링가이트 및 수산화칼슘의 피크가 증가함을 알 수 있었다. 그리고  $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ 의 피크는 화학약품 침지 전후에 큰 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 포졸란 재료를 혼합하지 않은 기준 콘크리트 및 포졸란 재료를 혼합한 순환골재 콘크리트의 화학약품 침지에 따른 내부조직을 검토하기 위하여 침지 기간 6개월에서 시료를 채취하여 수은압입법에 의해 공극 직경별 공극량을 측정된 결과이다. 포졸란 재료를 사용하지 않은 콘크리트에 대한 분석결과인 Fig. 7에서 화학약품에 침지함으로써 콘크리트 내부 조직이 손상되어 공극이 많이 발생되어 공극직경  $0.02\mu\text{m}$  이상의 공극량이 많이 증가되는데 반해 포졸란 재료를 사용한 경우의 분석결과인 Fig. 8에서는 공극직경  $0.02\mu\text{m}$  이상의 공극량 변화가 상대적으로 적은 것을 알 수 있다.

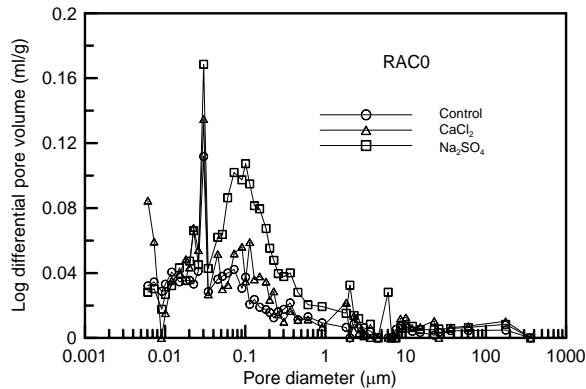


Fig. 7 Pore size distribution in the concrete without pozzolanic material

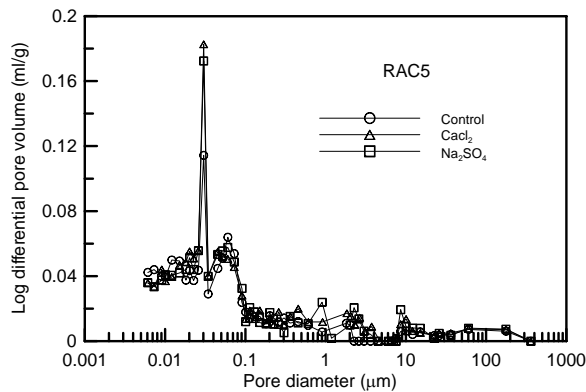


Fig. 8 Pore size distribution of the concrete mixed with pozzolanic material(RAC5)

#### 4. 결론

플라이애쉬, 하소시킨 슬래그 미분말 및 규조분말의 포졸란 재료를 사용한 순환골재 콘크리트의 화학약품 저항성을 평가하기 위하여  $\text{CaCl}_2$  용액 및  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액의 침지 시험에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 10% 농도의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액에 콘크리트를 6개월 침지한 결과, 배합에 따라 침지기간 2~4개월까지는 서서히 압축 강도가 증가하였고, 그 이후는 강도가 약간 감소하는 경향이 나타났으며, 콘크리트의 질량은 침지 후 약 0.1-0.3% 증가되었다.

2) 10% 농도의  $\text{CaCl}_2$ 의 용액에 콘크리트를 6개월 침지한 결과, 침지기간 2~3개월까지는 강도가 크게 증진되었으며 그 이후는 강도가 급격히 감소하는 경향을 나타냈다.

3) 화학약품 침지 전후의 콘크리트의 공극량 분석 및 수화물에 대한 X.R.D 분석 결과, 침지전보다 침지후에 수

산화칼슘 및 에트링가이트의 피크가 증가하고  $0.02 \mu\text{m}$  이상의 공극량이 증가하였는데, 포졸란 재료를 혼합하는 경우 이러한 현상이 감소되어 포졸란 재료의 사용은 순환골재 콘크리트의 화학약품 저항성 증진에 도움이 되는 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 환경부, 한국환경자원공사, 2008 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2009
2. 건설교통부, 순환골재 품질기준, 2005
3. Dae-Joong Moon, Han-Young Moon, Shigeyoshi Nagataki, Makoto Hisada, Tatsuhiko Saeki, Improvement on the Quality of Recycled Aggregate Concrete Containing Super Fine Mineral Admixtures, Proceedings of the First FIB Congress 2002, Concrete Structures in the 21st Century, Vol.2, Session 10, Osaka in JAPAN, 2002.10, pp.29-30.
4. Ahmad Shayan and Aimin Xu, Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate, ACI Material Journal, Vol.100, No.5, Sept. 2003, pp.371-380.
5. Hentichsen, A., Use of Recycled Aggregates in Europe, International Workshop on Recycled Concrete, JSPS 76 Committee on Construction Materials, Sept. 1999, pp.1-8.
6. S. Nagataki, A. Gokce, T. Saeki and M. Hisada, Assessment of Recycling Process Induced Damage Sensitivity of Recycled Concrete Aggregates, Cement and Concrete Research, Vol.34, No.6, June 2004, pp.965-971.
7. Jin Cheol Kim, Jae Won Shin, Kyu Seong Cho and Kang Sik Choi, Utilization of Recycling Aggregate on the Pavement, Technology and Policy Forum for the Resource of Construction Waste, Environment Forum of Congress and Construction Technical Institute of Chungang University, Seoul, 2004, 4, pp.29-63.
8. Nagataki and K. Iida, Recycling of Demolished Concrete, Special Publication of ACI, Vol.200, June 1, 2001, pp.1-20.
9. Cao, H. T., Bucea, L., Ray, A. and Yozghatlian, S., The Effect of Cement Composition and pH of Environment on Sulfate Resistance of Portland Cements and Blended

- Cements, Cement and Concrete Composites, Vol. 19, 1997, pp. 161-171.
10. RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Performance Criteria for Concrete Durability, 1995, p. 147.

#### 포졸란 재료와 순환골재를 사용한 콘크리트의 화학약품 저항성

순환골재를 사용한 콘크리트에서 플라이애쉬, 하소시킨 슬래그 미분말 및 규조분말이 콘크리트의 내화학약품성에 미치는 영향을 실험을 통해 검토하였다. 본 연구에서는 밀도  $2.48\text{g/cm}^3$ , 흡수율 4.25%이고 표준입도 범위의 순환골재를 사용한 콘크리트에 대하여 10% 농도의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  및  $\text{CaCl}_2$ 의 용액에 6개월 침지한 화학약품에 대한 저항성시험을 실시하였다. 이 침지시험에서 플라이애쉬, 하소시킨 슬래그 미분말 및 규조분말을 혼합한 경우가 이들을 사용하지 않은 경우에 비하여  $0.02\mu\text{m}$  이상의 공극량이 감소하는 경향이 나타났기 때문에 포졸란 재료의 사용은 순환골재 콘크리트의 화학약품 저항성 증진에 도움이 되는 것으로 판단된다.